

Akustische Nahfeldholografie innerhalb von Strömungen

Tobias Berkefeld¹, Stefan Kröber², Carsten Spehr³

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 37073 Göttingen, Deutschland, Email: tobias.berkefeld@dlr.de

² Daimler AG, 71059 Sindelfingen, E-Mail: Stefan.Kroeber@daimler.com

³ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 37073 Göttingen, Deutschland, Email: carsten.spehr@dlr.de

Einleitung

Bei der Lokalisierung von aeroakustischen Schallquellen an Modellen in Windkanälen mit offener Messstrecke wird das Mikrofonarray üblicherweise außerhalb der Strömung platziert und die gemessenen Mikrofonensignale mit einem Beamforming-Algorithmus ausgewertet. Dabei durchqueren die Schallwellen die Scherschicht des Freistrahls, was aufgrund spektraler Verbreiterung durch Brechungs- und Streueffekten zu einer Messungenauigkeit führt. Außerdem ist das räumliche Auflösungsvermögen des Beamformings proportional zur Wellenlänge der Schallwellen. Dies bedeutet, dass das Auflösungsvermögen insbesondere bei tiefen Frequenzen stark eingeschränkt ist.

Als Alternative zum Beamforming in tiefen Frequenzbereichen wurde die Methode der akustischen Nahfeldholografie innerhalb der Strömung untersucht. Es wurden Schalldruckwerte mit einem traversierbarem Mikrofonrechen sowie einem ortsfestem Referenzmikrofon innerhalb des Potentialkerns eines Freistrahls aufgezeichnet und mit der Methode der akustischen Nahfeldholografie unter Verwendung der konvektiven Wellengleichung ausgewertet. Die Untersuchungen wurden an einer elektrodynamischen Schallquelle sowie einem Hochauftriebsmodell im Aeroakustischen Windkanal Braunschweig (AWB) durchgeführt.

Messaufbau

Für den Messaufbau im AWB wurde ein in Strömungsrichtung verfahrbarer Rechen mit 10 Mikrofonen im Abstand von 5 cm in y -Richtung und ein ortsfestes Referenzmikrofon in einem Umströmungskörper mit einem G.R.A.S. Nasenkonus verwendet. Die Messmikrofone waren mit Nasenkoni von Brüel & Kjaer versehen. In Strömungsrichtung wurden 131 Messpunkte mit einem Abstand von 1 cm aufgezeichnet, so dass insgesamt 131x10 Messpunkte vorhanden waren.

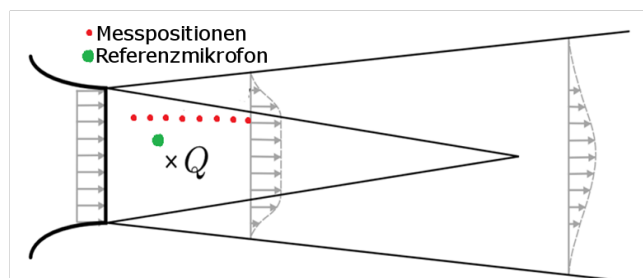


Abbildung 1: Skizze des verwendeten Messaufbaus

Das Referenzmikrofon befand sich zwischen der Messebene und der Schallquelle. Bei allen verwendeten Mikrofonen handelt es sich um 1/4" G.R.A.S. Mikrofone. Als Schallquelle wurde zum Einen eine elektrodynamische Referenzschallquelle [3] (Lautsprecher in einem Umströmungskörper) und zum Anderen ein Hochauftriebstragflügelmodell als rein aeroakustische Quelle verwendet. Die Messungen wurden bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 30 m/s und 60 m/s durchgeführt.



Abbildung 2: Foto der Messstrecke mit dem Mikrofonrechen und der Referenzschallquelle

Auswertung

Unter der Annahme von stationären Signalen wurde der komplexe Phasenbezug der zu unterschiedlichen Zeiten und an unterschiedliche Positionen des Rechens aufgenommenen Signale durch Verwendung der Kreuzleistungsspektren aus den Signalen der Messmikrofone und des ortsfesten Referenzmikrofon hergestellt. Unter Annahme einer räumlich wie auch zeitlich konstanten Strömungsgeschwindigkeit V_x mit nur einer Komponente (x -Richtung) wird die konvektive Wellengleichung (1) für den Schalldruck \hat{p} im Frequenzbereich angenommen.

$$0 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(1 - \frac{V_x k_x}{\omega} \right)^2 \hat{p} + \nabla^2 \hat{p} \quad (1)$$

Mit der Schallgeschwindigkeit c , der Kreisfrequenz ω und der x -Komponente der Wellenzahl k_x . Diese Wellengleichung wird mittels Fouriertransformation in x - und y -Richtung (gekennzeichnet durch $\tilde{}$) gelöst (2). Hierbei ist \tilde{G} der Frequenz- und Wellenzahl abhängige Propagator.

$$\hat{p}(x, y, z, f_n) = \mathcal{F}_{xy}^{-1} \left[\hat{\tilde{p}}_m \tilde{G} \right] \quad (2)$$

mit

$$\tilde{G} = \begin{cases} e^{i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}(z - z_m)} & \text{wenn } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \\ e^{i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}(z - z_m)} & \text{wenn } k_x^2 + k_y^2 > k^2 \end{cases} \quad (3)$$

und der komplexen Schalldrücken an den Messpositionen \hat{p}_m .

Die Fallunterscheidung in \tilde{G} resultiert aus Ausbreitungsfähigkeit von den durch die Wellenzahlen beschriebenen Wellen. Ist $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ reell handelt es sich um ausbreitungsfähige Wellen. Ist k_z imaginär handelt es sich um exponentiell abklingende Wellen (Nahfeld). Da in der Auswertung exponentiell abklingende Wellen dementsprechend exponentiell mit dem Abstand aus Mikrofon- und Messebene verstärkt werden und das Signal in diesem Fall oft unter dem Kanallärm liegt wird ein Wellenzahlabhängiger Filter verwendet, um nicht den Kanallärm zu verstärken.

Ergebnisse

In Abbildung 3 sind Ergebnisse von Beamformingmessungen bei gleichem Aufbau sowie Ergebnisse der akustischen Nahfeldholografie dargestellt. Als Schallquelle dient die elektrodynamische Schallquelle. Es ist zu sehen, dass der Schalldruckpegel bei tiefen Frequenzbereichen wie zu erwarten bei der Nahfeldholografie stärker vom Maximum abfällt als beim Beamforming.

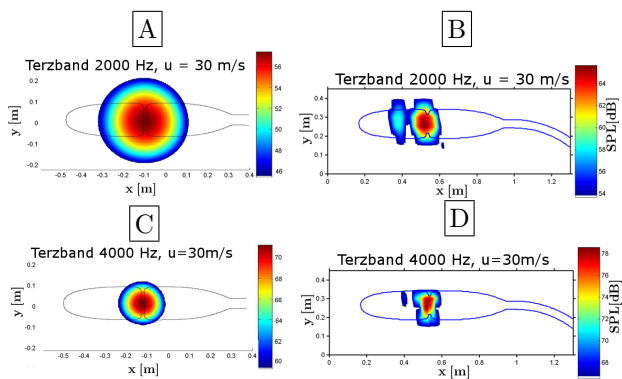


Abbildung 3: Vergleich von Beamformingergebnissen (A u. C) und Ergebnissen der akustischen Holografie (B u. D) bei $U_{inf} = 30$ m/s. Dargestellt sind die Terzbänder mit der Mittenfrequenz 2000 Hz (A u. B) und 4000 Hz (C u. D) bei einem Dynamikumfang von 12 dB

In Abbildung 4 sind ausschließlich Ergebnisse der Nahfeldholografie mit dem Hochauftriebstragflügelmodell bei einem Anstellwinkel von 5° als Schallquelle dargestellt. Es sind aeroakustische Quellen zu sehen die sich mit den Erwartungen decken. Im Terzband um 2500 Hz ist eine deutliche Quelle im Bereich des Vorfügels zu sehen. In den Quellkarten der Terzbänder $f = 6300$ Hz und $f = 8000$ Hz sind Quellen an der hinteren Kante des Vorfügels zusehen. Bei $f = 8000$ Hz sind deutliche Quellen über den Befestigungen des Vorfügels zu sehen. Gerade bei der Messung an dem Hochauftriebsmodell traten aufbaubedingte Schwierigkeiten auf. Bei zu großen Anstellwinkeln des Modells wird der Freistrah des Windkanals zu stark in Richtung des Mikrofonrechs abgelenkt. Zum einen treten dann verstärkt Schwingungen des Rechens auf und zum anderen stimmt so die Annahme der konstanten Strömungsgeschwindigkeit

nicht.

Zusammenfassung

Im auswertbaren Frequenzbereich lassen sich die untersuchten Quellen bei allen untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten lokalisieren. Im Vergleich zum Beamforming ist unter Verwendung der Nahfeldholografie gerade in tieferen Frequenzen eine genauere Lokalisierung möglich.

In der Luftfahrt werden durch Skalierung der Modelle relativ hohe Frequenzbereiche untersucht. Durch die oberen Grenzfrequenzen die aus den Abständen der Mikrofone und dem Abstand der Messebene zur Quelle resultieren ist die Verwendung der Holografie in Strömungen für diesen Bereich nur bedingt geeignet. Besser geeignet wäre die Methode bei der Untersuchung von größeren Modellen, bei denen besonders tiefere Frequenzbereiche untersucht werden sollen. Denkbar sind weitere Untersuchungen z.B. in der Automobilindustrie.

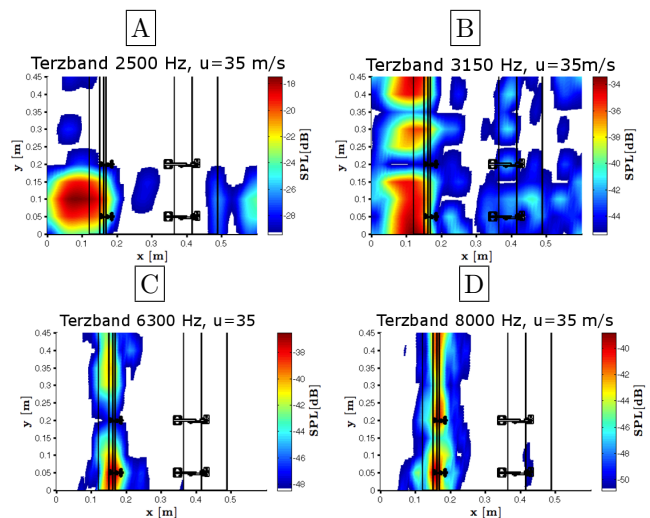


Abbildung 4: Quellkarten von dem Hochauftriebstragflügelmodell bei $U_{inf} = 35$ m/s. Dargestellt sind Terzbänder mit den Mittenfrequenzen 2500 Hz (A), 3150 Hz (B), 6300 Hz (C) und 8000 Hz (D)

Literatur

- [1] Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH von J.D. Maynard, E. G. Williams und Y. Lee
- [2] Planar near-field acoustical holography in a moving medium von R.J. Ruhala
- [3] Kröber, Stefan und Ehrenfried, Klaus und Koop, Lars (2008) Design and testing of sound sources for phased microphone array calibration. bebec2008 Berlin Beamforming Conference, 2008-02-19 - 2008-02-20, Berlin.